

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Frézování tvarových ploch

Free Form Surface Milling

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Student:

Martin Jakubec

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

OSTRAVA 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Jakubec**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Frézování tvarových ploch**
Free Form Surface Milling
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Přehled řezných nástrojů a strategií při frézování tvarových ploch.
2. Návrh vhodných řezných nástrojů pro konkrétní aplikaci.
3. Zhodnocení a rozbor obráběných ploch zadané součásti.
4. Aplikace navrhovaných strategií se zaměřením na kvalitu obrobeneho povrchu a strojní čas.
5. Zhodnocení a rozbor dosažených výsledků návrhu.

Seznam doporučené odborné literatury:

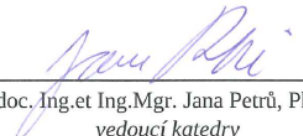
- [1] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2010, 138 s., ISBN 978-80-248-2278-4.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. 256 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] SADÍLEK, M.; ČEP R.; OTÁHAL, D. Vliv náklonu nástroje při frézování. *Odborná konference - Frézování IV*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, 13-18 s. ISBN 80-214-3239-X.
- [4] SADÍLEK, M. Vyspělé strategie ve 3D frézování. *MM Průmyslové spektrum*, 2004, č. 12, 46-47 s. ISSN 1212-2572.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě12.5.2014.....

..........
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 12. 5. 2014


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Martin Jakubec

Adresa trvalého pobytu autora práce: Luh 1806, Vsetín

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Marku Sadílkovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JAKUBEC, M. *Frézování tvarových ploch*: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 48 s., Vedoucí práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Bakalářská práce obsahuje návrh a následné otestování frézovacích strategií při programování v CAM softwaru Mastercam. Výsledkem je realizace výroby tvárníku na 5osém frézovacím centru DMU 50. Navržené strategie a řezné nástroje byly otestovány při výrobě na tvarových plochách tvárníku. Následně probíhají měření daných bodů na dvou různých strojích. Pro měření na obráběcím centru DMU je v bakalářské práci vytvořen i NC program, který lze také využít pro měření jakékoli jiné součásti. Výstupem práce je tvárník v různých fázích obrobění s informačními kartami, které informují o daných fázích obrábění.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

JAKUBEC, M. *Free Form Milling Surface: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working, Assembly and Engineering Metrology, 2017, 48 p., Thesis head: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Bachelor thesis includes the suggestion and subsequently testing of milling strategies when programming in CAM software Mastercam. The result is the realization of mansory production at the 5axis milling center DMU 50. The proposed strategies and cutting tools have been tested during production on the form surfaces of the mansory. Subsequently, the points are measured on two different machines. For measurement at the DMU machining center is in this bachelor's thesis created NC program, which can be also used for measuring any other component. The output of the work is a product in various stages of machining with information cards, which inform about given stage of machining.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	3
ÚVOD.....	4
1 FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH POMOCÍ CAM SYSTÉMŮ	5
1.1 Tvarová plocha.....	5
1.2 2,5osé, 3osé a víceosé frézování	5
1.3 Frézování tvarových ploch před příchodem CAM systémů	6
1.4 CAM software.....	7
1.5 Základní skupiny frézovacích operačních úseků	8
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	10
2.1 Popis výrobku.....	10
2.2 Použité stroje.....	10
2.2.1 Frézovací centrum DMU 50	11
2.2.2 Obrobková měřicí sonda RMP60	11
2.2.3 Centrální upínač CU – T 77	12
2.2.4 Souřadnicový měřicí stroj Wenzel LH65 X3M	13
2.3 Materiál výrobku.....	14
2.4 Návrh vhodných frézovacích strategií	15
2.4.1 Pro hrubování.....	15
2.4.2 Pro předdokončování	17
2.4.3 Pro dokončení	18
2.4.4 Pro zbytkové dokončení.....	21
2.5 Návrh vhodných řezných nástrojů	22
2.5.1 Pro hrubování.....	23
2.5.2 Pro předdokončování	26
2.5.3 Pro dokončování	28
2.5.4 Pro zbytkové dokončení.....	30
2.6 Zhodnocení návrhů použitých při experimentu	33
2.6.1 Rozměrová přesnost.....	33
2.6.2 Strojní čas	40
2.6.3 Návrh pro zlepšení	42

ZÁVĚR	45
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	46
SEZNAM PŘÍLOH.....	48

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CAD	Počítačem podporovaný návrh Computer Aided Design	[-]
CAM	Počítačem podporovaná výroba Computer Aided Manufacturing	[-]
CNC	Číslicové řízení počítačem Computer Numerical Control	[-]
FHSS	Systém rozšíření frekvenčního spektra přepínáním frekvence Frequency Hopping Spread Spectrum	[-]
NC	Číslicové řízení Numerical Control	[-]
R	Poloměr zaoblení špičky nástroje	[mm]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
a_e	Radiální hloubka řezu	[mm]
a_p	Axiální hloubka řezu	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
i	číslo měření	[-]
j	počet měření	[-]
k	číslo měřeného bodu	[-]
k_t	časový koeficient	[-]
n	otáčky vřetena	[min ⁻¹]
v_c	Řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
x	průměrná naměřená hodnota	[mm]
ø	průměr nástroje	[mm]

ÚVOD

Pro oblast frézování tvarových ploch pomocí CAM systémů existuje mnoho různých strategií a postupů, jak dosáhnout požadované tvarové plochy. S nabídkou nástrojů použitelných pro tyto strategie je to na trhu s nástroji podobné.

Hlavním úkolem této bakalářské práce je výroba tvárníku v jednotlivých fázích jeho výroby a vytvoření informačních karet. Tyto informační karty budou následně sloužit společně s tvárníkem pro výuku CAM systémů a při prezentacích Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Tomuto úkolu předchází návrh a popis frézovacích strategií společně s návrhem nástrojů, které budou následně použity při výrobě tvárníku.

Po výrobě celého tvárníku bude potřeba zkontrolovat jeho rozměry v zadaných bodech. Za tímto účelem by měl být vytvořen NC program pro stroj DMG MORI, který automaticky proměří tvárník v zadaných bodech. Program by měl být napsán tak, aby mohl být použit Katedrou obrábění, montáže a strojírenské metrologie i v budoucnu při proměřování libovolných součástí v libovolných bodech.

Poslední část této bakalářské práce se bude zabývat výpočtem koeficientu strojního času pro korekci strojního času vypočteného softwarem Mastercam a návrhem pro zkvalitnění výroby tvárníku.

1 FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH POMOCÍ CAM SYSTÉMŮ

1.1 Tvarová plocha

Za tvarové plochy jsou považovány různě zakřivené plochy, jejichž tvar se liší od tvaru pravidelných těles, jako jsou hranol, válec, jehlan, atd. [1]

Tvarové plochy lze vyrobit soustružením, frézováním nebo nekonvenčními obráběcími metodami, jako například elektroerozivním obráběním. [1]

Při frézování je tvarová plocha vyrobena buď tvarovým nástrojem, který má tvar negativu potřebné plochy nebo běžnými nástroji jako jsou válcové frézy. Při použití běžných válcových fréz je podmínkou pro vytvoření takovéto plochy sdružený posuv více os najednou. [1]

1.2 2,5osé, 3osé a víceosé frézování

Pro frézování tvarových ploch existuje řada různých strojů. Od klasických konvenčních strojů až po moderní CNC obráběcí centra. V dnešní době je pro frézování tvarových ploch nejčastěji využíváno CNC strojů. Jednotlivé CNC frézky lze rozdělit podle mnoha kritérií. Jedním ze základních kritérií, dle kterých je možné CNC frézky rozdělit, je počet os, které lze při obrábění použít.

Prvním typem CNC frézek jsou frézky umožňující 2,5osé obrábění. Tyto frézky umožňují současný pohyb nástroje (nebo obrobku) ve dvou osách, přičemž třetí osa je pevně nastavena na danou hodnotu. Tuto hodnotu lze změnit, pouze pokud se zbývající dvě osy nepohybují. Tento typ pohybu umožňují téměř všechny CNC frézky. [2, 3]

Druhým typem CNC frézek jsou frézky, které umožňují 3osé obrábění. Při tomto druhu obrábění, se nástroj (nebo obrobek) může pohybovat současně ve všech třech osách, čímž zkracuje čas potřebný pro obrábění a umožňuje vytvoření plynulých přechodů jednotlivých ploch. [2, 3]

Posledním typem CNC frézek jsou ty, které umožňují víceosé obrábění. Pojmem víceosé se myslí současný pohyb nástroje (nebo obrobku) ve více než třech osách. Tyto stroje jsou rozdělovány na dva typy:

- 4osé obráběcí stroje – Tyto stroje umožňují klasický pohyb v osách X, Y, Z, ale přidávají k němu ještě navíc další pohyb. Tímto pohybem může být například otáčení stolu s obrobkem nebo jeho náklon mimo vodorovnou rovinu. Všechny tyto pohyby se mohou při obrábění uskutečňovat současně.
- 5osé obráběcí stroje – Tyto stroje umožňují pohyb ve třech osách současně spojených s rotací kolem dvou os (otáčení stolu s obrobkem, náklon stolu mimo vodorovnou rovinu). Tyto stroje proto umožňují obrobení plochy s libovolnou orientací. [2, 3]

Všechny tyto stroje lze použít pro obrábění tvarových ploch, záleží pouze na složitosti plochy. Podle složitosti plochy se určí, v kolika osách bude potřebný pohyb pro co nejdokonalejší obrobení.

Výše uvedené stroje jsou pouze základním výčtem nejpoužívanějších. Byly sestaveny i obráběcí stroje se sto osami a více. [2]

1.3 Frézování tvarových ploch před příchodem CAM systémů

Systémy pro počítačovou podporu výroby, označovány také jako CAM systémy vznikly vlastně teprve nedávno. Tato skutečnost je dána tím, že CAM systémy úzce souvisí s vývojem výpočetní techniky a CAD systémů. V polovině 20. Století je datován zrod CAD systémů, díky vzniku geometrického jazyku. Rok 1963 pak přinesl úspěšné vykreslení a ovládání grafických předmětů na displeji. Následnému rozšíření CAD/CAM systémů proto již nestálo nic v cestě [4].

Před příchodem NC a CNC obráběcích strojů byly tvarové plochy obráběny pouze třemi možnostmi:

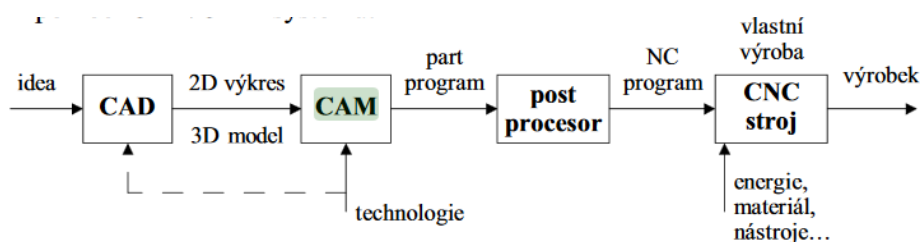
- *„Využitím tvarových řezných nástrojů (fréz).*
- *Použitím sdružených posuvů na konvenčních frézkách. ...*
- *Obrábění tvarových ploch kopírovacím způsobem (využití kopírovacího zařízení) na konvenčních frézkách“ [2].*

V dnešní době jsou tyto způsoby obrábění viděny občas v malosériové výrobě jednoduchých tvarových ploch. Pokud je totiž potřeba při obrábění pohyb současně ve třech osách, není jiné východisko než CNC obráběcí stroj [2].

Mezi těmito dvěma vývojovými etapami, vznikly ještě NC obráběcí stroje. Tyto stroje ulehčovaly práci na konvenčních strojích. Pomocí děrovacích štítků bylo možné „naprogramovat“ jednotlivé posuvy konvenčního stroje v pořadí, v jakém měli postupně běžet.

1.4 CAM software

Za CAM software jsou považovány systémy, které připravují data potřebná pro řízení numericky řízených strojů pro samočinnou výrobu výrobků. Aby mohl být CAM systém využíván, musí být nejdříve vytvořen model součásti pomocí CAD systému (systém podporující konstrukci součásti). Tento model je poté importován do CAM systému, ve kterém proběhne nastavení technologických operací a vygenerování partprogramu. Tento program již obsahuje data potřebná pro výrobu dané součásti, ale není čitelný pro numericky řízené stroje. Jelikož existuje velká řada řídicích systémů pro numericky řízené stroje, je potřeba k převedení partprogramu využít postprocesor. Tento postprocesor převede partprogram do čitelné podoby pro daný stroj a vygeneruje již hotový NC program. [4]



Obr. 1 Struktura výroby součásti s pomocí CAD/CAM systému [5]

V dnešní době se na trhu nachází obrovské množství různých CAM softwarů od různých výrobců. Liší se od sebe hlavně cenou, ale také kvalitou použitelných strategií pro generování drah nástrojů. Mezi nejznámější a nejpoužívanější CAM systémy jsou zařazovány například SolidCAM, Mastercam, HSMWorks, Inventor HSM, Surfcam,

WorkNC, Edgecam a další. Každý z těchto CAM systémů má své výhody a nevýhody, které určují jeho použitelnost pro různé druhy výroby.

Jelikož na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie je využíván při výuce CAM software Mastercam, bude i při experimentu v této bakalářské práci využit software Mastercam.

Mastercam patří mezi nejrozšířenější CAD/CAM systémy na světě. Výrobce tohoto softwaru je americká firma CNC Software, Inc. Mastercam lze využít jak pro obráběcí, tak i pro tvářecí stroje. Lze jej aplikovat pro jakýkoli CNC stroj. [6]

1.5 Základní skupiny frézovacích operačních úseků

Při výrobě tvarových součástí jsou frézovací operační úseky rozdělovány do tří základních skupin. Tyto skupiny frézovacích operačních úseků na sebe navazují a jejich úkolem je zkrátit čas potřebný k výrobě tvarové součásti, a tím snížení výrobních nákladů.

První takovouto skupinou operačních úseků jsou hrubovací operační úseky. Účelem těchto operačních úseků je co největší úběr materiálu, za co nejkratší dobu. Po ukončení této skupiny operačních úseků zůstává na obrobku přídavek pro další obrábění. Při hrubovacích operačních úsecích nezáleží na přesnosti a kvalitě povrchu obráběného materiálu, jelikož následně na stejných plochách probíhají další operační úseky. Pro zvýšení efektivity se používá vždy největší možný nástroj, který díky své velikosti dokáže odebrat největší třísku s malým opotřebením. Takovými nástroji bývají nejčastěji čelní válcové frézy. [2, 7]

Po skupině hrubovacích operačních úseků následuje skupina předdokončovacích operačních úseků. Tato skupina operačních úseků má za úkol odstranit výstupky po předchozí skupině hrubovacích operačních úseků. Při předdokončovacích operačních úsecích se nejčastěji využívají kopírovací frézy, které dokážou lépe kopírovat výsledný tvar obrobku, a tím zanechávat relativně konstantní přídavek na všech plochách. Díky tomuto relativně konstantnímu přídavku je docíleno relativně konstantního zatížení frézy při dalších (dokončovacích) operačních úsecích. [2, 7]

Jak již bylo zmíněno, další skupinou operačních úseků jsou operační úseky dokončovací. Úkolem této skupiny operačních úseků je dokončení tvarových ploch

na daný rozměr s co největší přesností a kvalitou povrchu. Nejčastěji se využívají kopírovací frézy menších průměrů ve spojení s malou hloubkou řezu. [2, 7]

Pokud se na povrchu obrobku nacházejí těžko přístupná místa, jako jsou rohy, kouty a malé dutiny, jejichž plocha je mnohokrát menší, než je celková plocha obrobku, lze využít poslední skupinu operačních úseků – zbytkové dokončovací operační úseky. Tyto operační úseky umožňují obrobení těžko přístupných míst na obrobku malým nástrojem, jehož použití na celý obrobek by bylo neekonomické. Tato skupina operačních úseků nebývá využívána tak často, jako předchozí skupiny operačních úseků. [8]

V některých případech můžou být některé skupiny operačních úseků v technologickém postupu vynechány. Toto rozdělení není totiž nijak závazné a záleží vždy na technologovi.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole bude popsán výrobek, na kterém budou aplikovány různé frézovací nástroje a strategie. Po dokončení výroby obrobku proběhne kontrola jeho rozměrů a bude vypočítán koeficient strojního času.

2.1 Popis výrobku

Pro experiment byl použit výrobek s názvem tvárník. Tvárník slouží na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie, jako ukázka při výuce CAM systémů během navazujícího magisterského studia oboru strojírenská technologie. Na tvárníku se nacházejí jak rovinné a šikmé plochy, tak i všemožné kulové plochy, zaoblení a dutiny. Díky tomu je možné aplikovat různé obráběcí strategie a hodnotit jejich vhodnost použití na různé druhy obráběných ploch.



Obr. 2 Zhotovený tvárník

2.2 Použité stroje

Při experimentu bylo použito 5osé frézovací centrum DMU 50 od firmy DMG MORI. Frézovací centrum bylo využito při testování frézovacích strategií a při měření rozměrové přesnosti po výrobě. Dalším strojem použitým při experimentu byl souřadnicový měřicí stroj Wenzel LH65 X3M. Tento souřadnicový měřicí stroj byl použit při měření rozměrové přesnosti tvárníku po výrobě za účelem nezávislého měření.

2.2.1 Frézovací centrum DMU 50

DMU 50 je 5osé frézovací centrum od Japonsko - Německé firmy DMG Mori Seiki. Jeho využitelnost je opravdu všestranná. Od kusové výroby tvarových forem a dílů až po sériovou výrobu. Předností tohoto stroje je otočný naklápěcí stůl, který dává stroji možnost vyrobit téměř jakýkoliv tvar. [9]

Tab. 1 Parametry frézovacího centra DMU 50 [9]

Otáčky vřetene	$[\text{min}^{-1}]$	20 – 18 000
Maximální výkon vřetene	$[\text{kW}]$	35
Počet pozic pro upnutí nástrojů	$[\text{ks}]$	16
Maximální rychlost	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	30
Zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	5
Pojezd v osách	$[\text{mm}]$	500 x 450 x 400
Otočný úhel	$[\text{°}]$	-5/110
Chlazení	$[-]$	Vnitřní / vnější
Řídicí systém	$[-]$	Heidenhain iTNC 530



Obr. 3 Frézovací centrum DMU 50 [9]

2.2.2 Obrobková měřicí sonda RMP60

K měření tvárníku byla použita obrobková měřicí sonda RMP60 od firmy Renishaw.

Tato sonda pracuje na principu elektrického odporu, kdy je dotek s tělem sondy spojen třemi válečky uloženými v šesti kuličkách. Dotkovou plochou mezi kuličkami a válečky prochází elektrický proud. Při vychýlení dotyku se zmenší velikost dotyku válečků s kuličkami, čímž vzroste elektrický odpor a sonda zaznamená dotyk. Přesnost sondy je udávána výrobcem na 0,001 mm. [10]

Sonda má i možnost nastavení spínací síly (nastavení velikosti změny odporu, při které zaznamená dotyk). [10]

Přenos signálu u sondy probíhá pomocí rádiového přenosu, čímž zaniká potřeba zajistit viditelnost mezi sondou a přijímačem. Rádiový přenos využívá technologii rozšíření frekvenčního spektra přepínáním frekvence (FHSS). Tento systém zabraňuje rušení signálu okolními vlivy, jako jsou třeba Wi-Fi sítě nebo mikrovlny. Při zjištění těchto rušivých vln přeladí systém komunikační kanál. [10]



Obr. 4 Měřicí sonda Renishaw RMP60 [10]

2.2.3 Centrální upínač CU – T 77

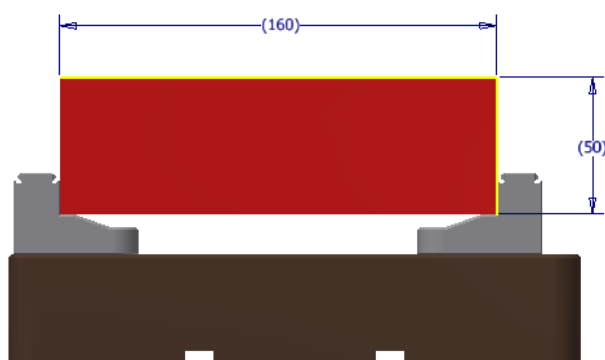
Pro upnutí obrobku bude použit centrální upínač KASTR CU – T 77. Použitím tohoto centrálního upínače bude dosaženo přesného upnutí tvárníku na střed.

Upínač byl navržen hlavně pro 4osé a 5osé obrábění. Lze jej však použít bez omezení i pro tříosé obrábění. [11]

Jeho předností jsou tvrdé zoubkové čelisti a možnost upnutí polotovaru, který bude 20x těžší než je samotný upínač za výšku pouhých 3 mm. I přes tuto malou upínací výšku výrobce uvádí, že upnutí bude spolehlivé i při hrubování v jakékoli poloze upínače. [11]

Výrobce uvádí, že při upínání hliníkových slitin a mědi je životnost čelistí téměř neomezená. [11]

Směr otočení čelistí pro upnutí polotovaru potřebného pro výrobu tvárníku a poloha polotovaru při upnutí je uvedena na obrázku 5.



Obr. 5 Poloha čelistí upínače pro upnutí polotovaru

2.2.4 Souřadnicový měřicí stroj Wenzel LH65 X3M

Souřadnicový měřicí stroj Wenzel LH65 X3M umožňuje pohyb ve třech osách. Základní deska je vyrobena z černého granitu. Tento materiál zaručuje rozměrovou stálost i při změnách teploty. Pohyb ve všech třech osách je veden po částech ze stejného materiálu, čímž je zaručena přesnost stroje i při tepelném zatížení. Stroj má výbornou ochranu vodících drah proti poškození a znečištění. [13]

Měření bylo uskutečněno pomocí otočné hlavy Renishaw PH10M.

Tab. 2 Parametry souřadnicového měřicího stroje Wenzel LH65 X3M [13]

Osa	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Měřicí rozsah	650	1000	500



Obr. 6 Souřadnicový měřicí stroj Wenzel LH65 X3M [12]

2.3 Materiál výrobku

Pro výrobu tvárníku bude použit materiál s marketingovým názvem CERTAL. Jedná se o hliníkovou slitinu s označením EN AW 7122 – AlZn5Mg3Cu. Materiál se vyznačuje vysokou pevností, a proto je nejčastějším využitím této hliníkové slitiny výroba forem a částí strojů (uchopovací čelisti pro roboty). Materiál je vhodný pro strojní obrábění. [14]

Tab. 3 Základní vlastnosti materiálu EN AW 7122 – AlZn5Mg3Cu [14]

Mez kluzu	[MPa]	430 – 460
Pevnost v tahu	[MPa]	490 – 530
Tažnost	[%]	2 – 7
Tvrdost	HBW	140 – 160
Objemová hmotnost	[g·cm ⁻³]	2,76
Modul pružnosti	[GPa]	72
Koeficient tepelné roztažnosti	[K ⁻¹ ·10 ⁻⁶]	23,6

2.4 Návrh vhodných frézovacích strategií

V této kapitole budou popsány frézovací strategie navržené pro jednotlivé frézovací operace tvárníku. Jako polotovar pro výrobu tvárníku byl zvolen kvádr o rozměrech 100x160x50 mm.

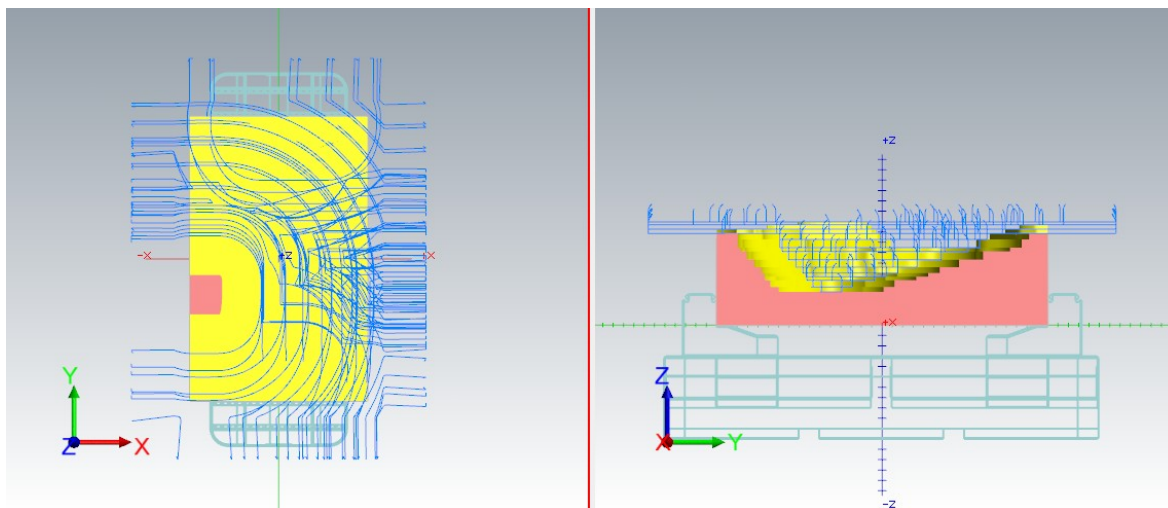
Nulový bod tvárníku byl zvolen na středu spodní strany polotovaru.

2.4.1 Pro hrubování

Operační úsek číslo: 1

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – hrubování

Tato strategie se využívá v případech, kdy lze zajíždět do materiálu zvenčí a není potřeba často využívat zajíždění do plného materiálu rampováním nebo spirálou. Při zajíždění do plného materiálu z vrchní strany je nástroj více opotřebováván, a tím je zkrácena jeho životnost. Výhodou této strategie je, že Mastercam může během jednoho operačního úseku měnit strategii frézování dle geometrie obrobku a tím zkracovat dobu obrábění i zlepšovat řezné podmínky pro nástroj. Při tomto operačním úseku bude vyhrubován základní profil tvárníku. [2, 15]

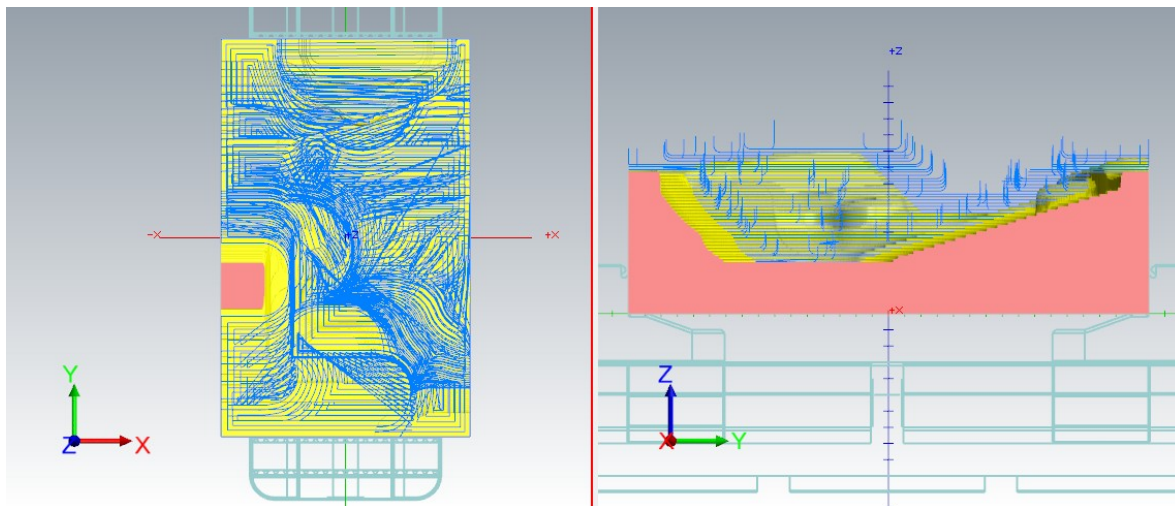


Obr 7 Dráhy nástroje pro první operační úsek – hrubování

Operační úsek číslo: 2, 3, 4

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – zbytkové hrubování

Tato strategie obrábí přídavky ploch, které na součásti zůstaly po předchozím operačním úseku hrubování. Při každém z těchto operačních úseků bude použita fréza s jiným průměrem, za účelem co největšího vyhrubování před dokončovacími operačními úseky. [2, 15]



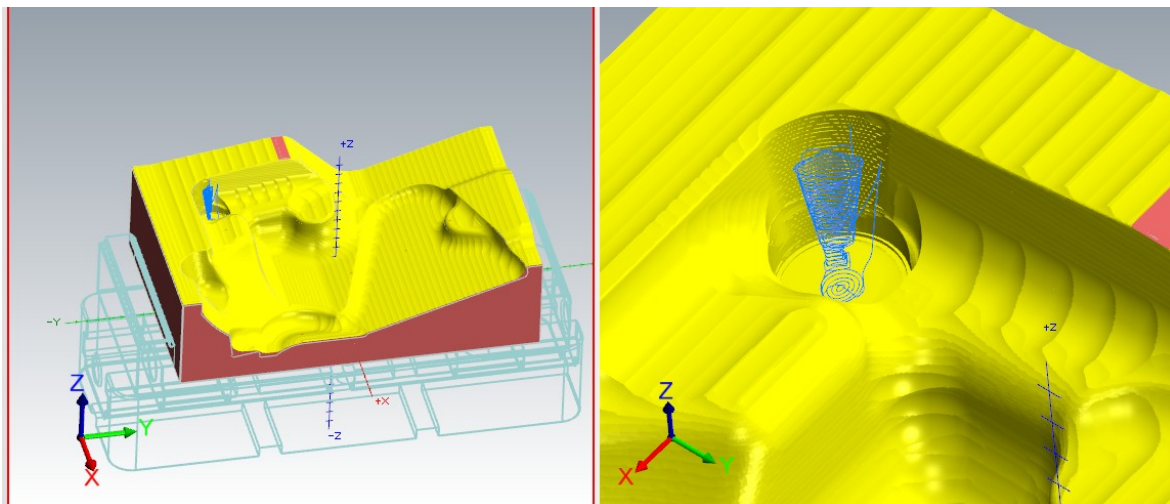
Obr. 8 Dráhy nástroje pro druhý operační úsek provedený strategií – zbytkové hrubování

Jelikož ani jeden z dosavadních operačních úseků nevyhruboval dutinu na tvárníku, bude za tímto účelem následovat operační úsek číslo 5.

Operační úsek číslo: 5

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – hybridní

Tato strategie využívá spojení strategií drsnost a Z-průřezy do jedné dráhy nástroje. Strategie plynule přepíná mezi oběma strategiemi při jedné dráze nástroje. [15]



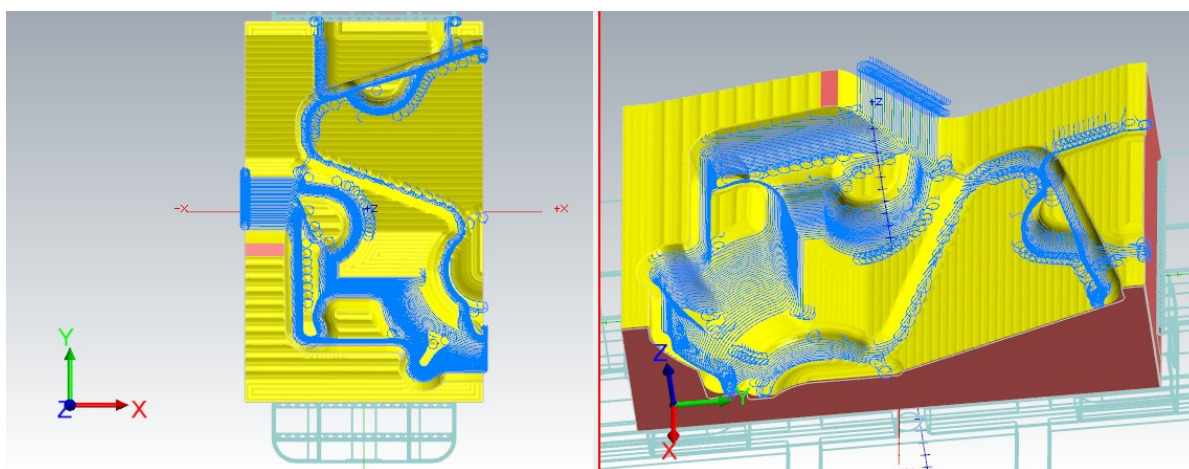
Obr. 9 Dráha nástroje pro pátý operační úsek provedený strategií – hybridní

2.4.2 Pro předdokončování

Operační úsek číslo: 6

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – Z-průřezy

Tato strategie tvoří dráhy nástroje z profilových křivek podél řezných ploch s konstantní Z souřadnicí. Ideální použití této strategie je pro plochy, jejichž sklon leží mezi 30° a 90° . U ploch s menším sklonem může docházet ke špatnému a méně efektivnímu odstraňování materiálu. Při tomto operačním úseku proběhne předdokončení strmých ploch tvárníku. [2, 15]

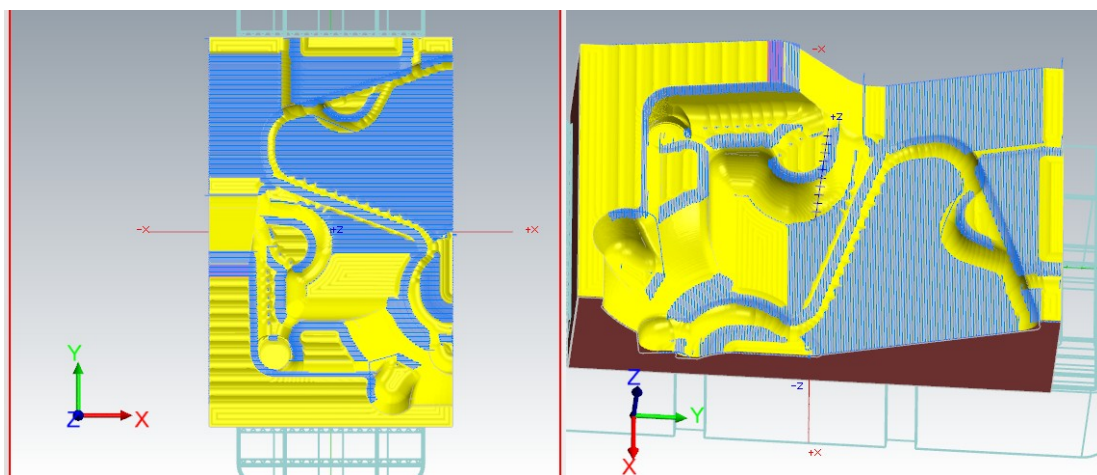


Obr. 10 Dráhy nástroje pro 6. operační úsek provedený strategií Z-průřezy

Operační úsek číslo: 7

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – řádkování

Tato strategie programuje dráhu nástroje pomocí přímek, které kopírují obráběný povrch. Řádkování se využívá hlavně pro povrchy, jejichž úhel s osou nástroje se blíží k 90° . Při tomto operačním úseku proběhne předdokončení mělkých ploch. [2, 15]



Obr. 11 Dráhy nástroje pro 7. operační úsek provedený strategií řádkování

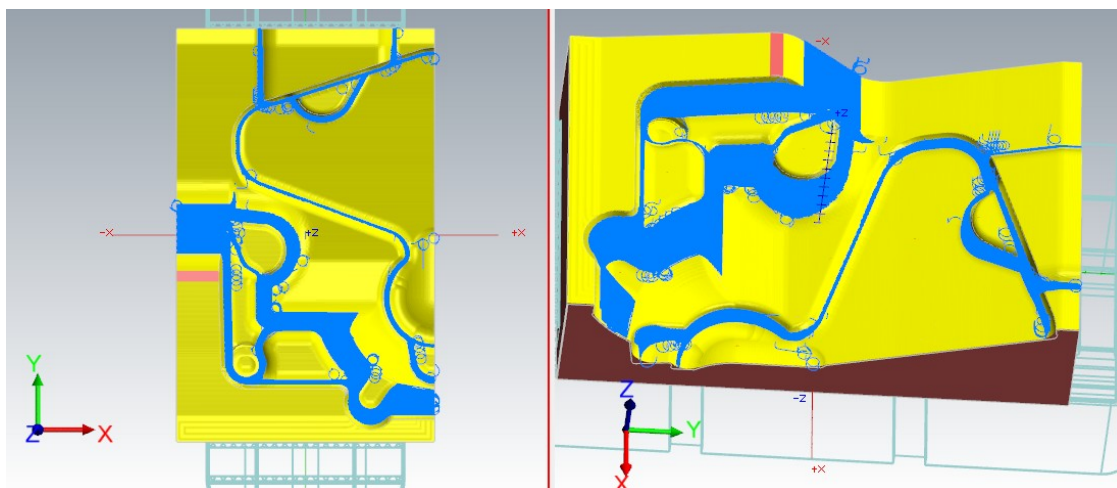
2.4.3 Pro dokončení

Následující operační úseky mají za úkol postupně dokončit většinu obráběných ploch. Při výběru frézovacích strategií je proto dáván zřetel na kvalitu obrobené plochy a rozměrovou přesnost.

Operační úsek číslo: 8

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – Z-průřezy

Tato strategie byla na dané plochy již jednou použita, ale nyní bude provedena s použitím frézy s menším průměrem a menší hloubkou záběru, čímž bude dosaženo přesnějšího obrobení a lepší kvality povrchu. Po tomto operačním úseku již budou strmé plochy tvárníku dokončeny bez přídavku na obrábění.

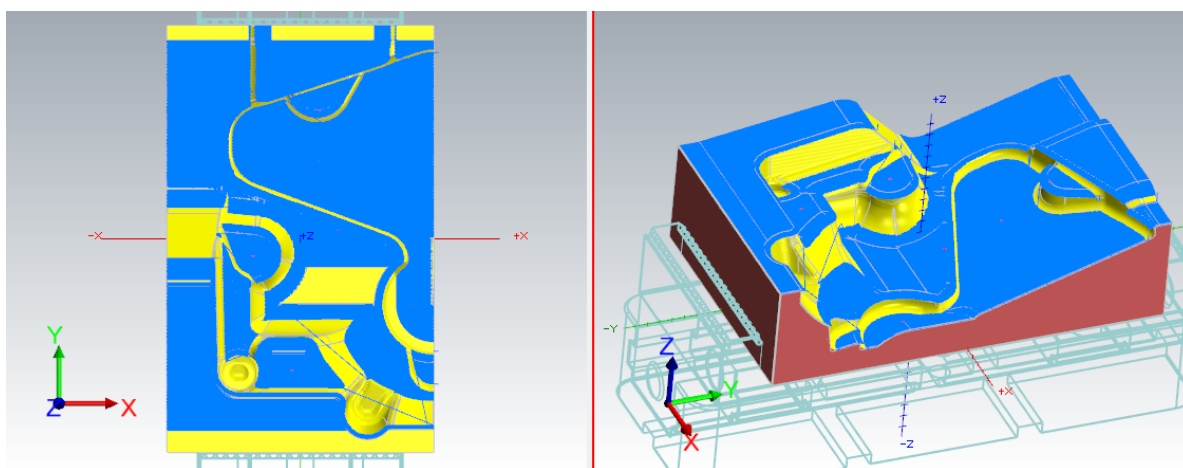


Obr. 12 Dráhy nástroje pro 8. operační úsek provedený strategií Z-průřezy

Operační úsek číslo: 9

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – řádkování

Tato strategie již byla také použita, ale byl u ní ponechán přídavek na obrábění. Proto bude aplikována znovu s menším průměrem frézy a menší hloubkou záběru. Výsledné plochy budou již vyrobeny bez přídavku na obrábění.



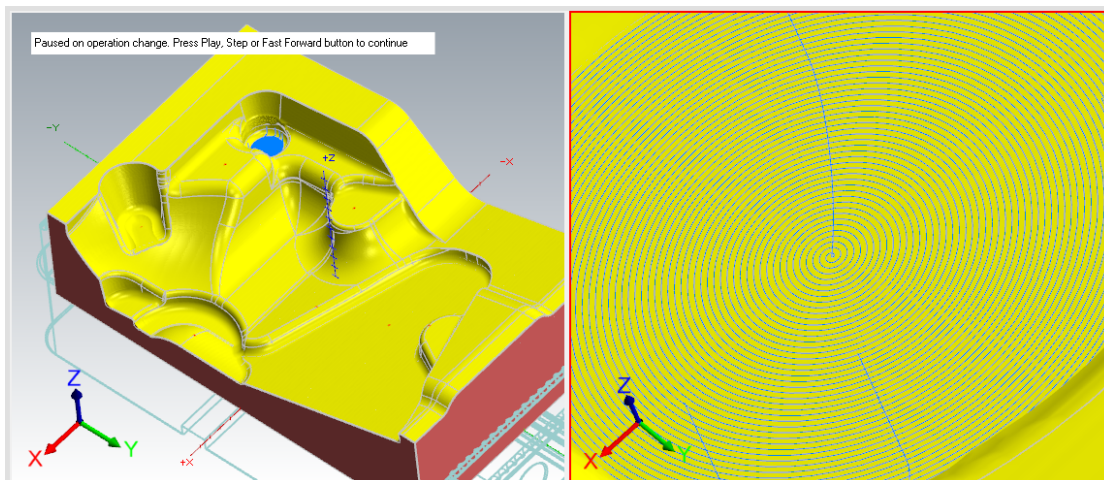
Obr. 13 Dráhy nástroje pro 9. operační úsek provedený strategií řádkování

Operační úsek číslo: 10

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – spirála

V operačním úseku číslo deset bude obrobena dutina v tvárníku s ponecháním malého přídavku pro zbytkové dokončení. Tato strategie vytváří spirálovou dráhu nástroje,

čímž nedochází k přerušení řezu a k zbytečným výjezdům. Podmínkou pro tuto strategii je obrábění tvaru, který lze obrábět kruhovým pohybem.[2, 15]

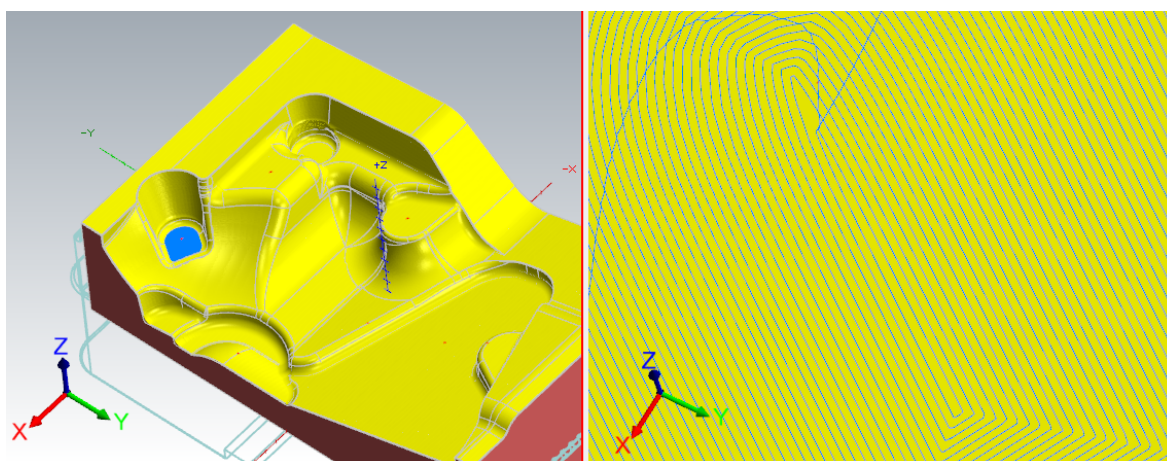


Obr. 14 Dráhy nástroje pro 10. operační úsek provedený strategií spirála

Operační úsek číslo: 11

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – drsnost

Během jedenáctého operačního úseku bude obrobena otevřená dutina tvárníku. Použitá strategie odměřuje vzdálenost jednotlivých drah nástroje podél povrchu místo rovnoběžně s rovinou nástroje. Tímto zajišťuje konstantní výšku vzniklých hřebenových výstupků na obráběném povrchu bez ohledu na sklon povrchu. [15]



Obr. 15 Dráhy nástroje pro 11. operační úsek provedený strategií drsnost

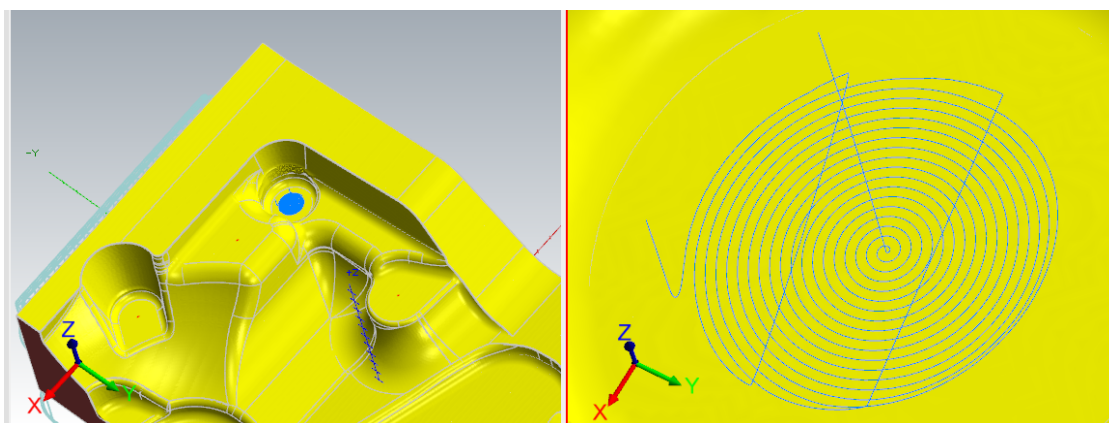
2.4.4 Pro zbytkové dokončení

V operačních úsecích zařazených do skupiny zbytkového dokončení, budou dokončeny zbývající plochy, které mají doposud nějaký přídavek na obrábění.

Operační úsek číslo: 12

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – spirála

Tato strategie již byla použita při desátém operačním úseku ve skupině operačních úseků pro dokončení. Nyní bude obrobená plocha vyrobena již bez přídavku pro další obrábění.

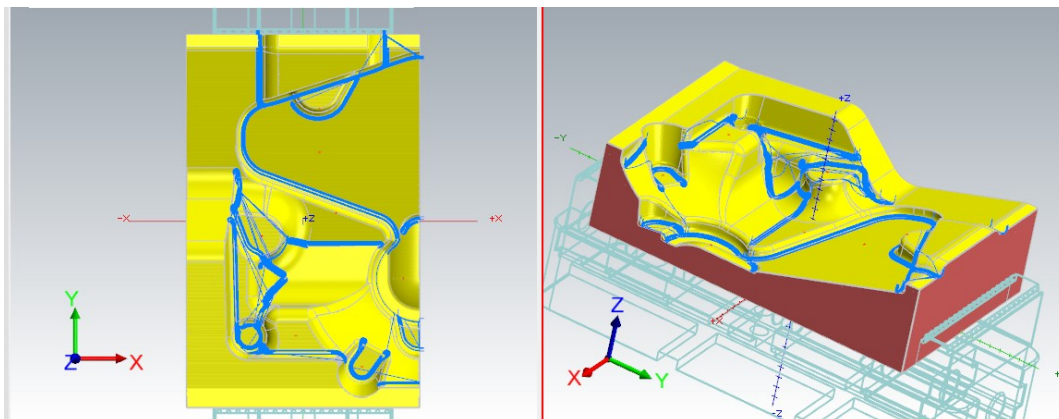


Obr. 16 Dráhy nástroje pro 12. operační úsek prováděný strategií spirála

Operační úsek číslo: 13

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – tužkové

Tato strategie se využívá k začištění rohů. Dráha nástroje sleduje průsečíky dvou nebo více povrchů a tím začišťuje jejich přechody. Lze vytvořit i více průchodů podél jednoho průsečíku, a tím dosáhnout ještě lepší kvality přechodu. [15]

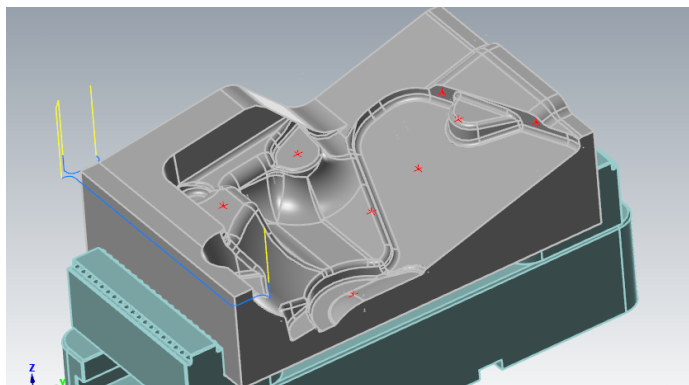


Obr. 17 Dráhy nástroje pro 13. operační úsek prováděný strategií tužkové

Operační úsek číslo: 14

Strategie obrábění: Vysokorychlostní frézování – 2D kontura

V posledním operačním úseku bude provedeno sražení hrany na jedné straně tvárníku. Sražení bude provedeno strategií 2D kontura.



Obr. 18 Dráha nástroje pro 14. operační úsek prováděný strategií 2D kontura

Po provedení všech čtrnácti operačních úseků bude tvárník celkově obroběn, a tím pádem i dokončen bez dalších přídavků na obrábění.

2.5 Návrh vhodných řezných nástrojů

V této kapitole budou navrženy vhodné řezné nástroje pro obrábění tvárníku. U každého nástroje budou navrženy optimální řezné podmínky s ohledem na nástroj a možnosti použitého stroje. Pro obrábění tvárníku budou použity jak nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami, tak nástroje monolitní.

2.5.1 Pro hrubování

Pro skupinu operačních úseků pro hrubování tvárníku bude využito postupně celkem 5 různých frézovacích nástrojů. Nástroje jsou měněny od největšího průměru po nejmenší. Přehled těchto pěti nástrojů je uveden v tabulce 4.

Tab. 4 Seznam nástrojů a řezných podmínek pro hrubování tvárníku

Úsek číslo	Strategie	Číslo nástroje	Nástroj	Otáčky n [min ⁻¹]		Axiální hloubka řezu a _p [mm]	Radiální hloubka řezu a _e [mm]	Přídavek [mm]	Vyložení nástroje [mm]
			Označení	Posuv na zub f _z [mm]					
			Výrobce	Řezná rychlost v _c [m·min ⁻¹]					
1.	Hrubování	5	Stopková válcová čelní fréza s VBD ø 44 mm	n	2531	4	13,2	2	70
			490-044C4-14H	f _z	0,15				
			Sandvik	v _c	350				
2.	Zbytkové hrubování	41	Stopková válcová čelní fréza s VBD ø 20 mm	n	15500	1	3	1,5	40
			R390-020 EH20- 07M	f _z	0,1				
			Sandvik	v _c	974				
3.	Zbytkové hrubování	156	Stopková kulová fréza s VBD ø 16 mm	n	6962	0,8	2,4	0,3	40
			16K2R035A- 16SRC12	f _z	0,25				
			Pramet	v _c	350				
4.	Zbytkové hrubování	161	Stopková kulová fréza s VBD ø 12 mm	n	9283	0,8	1,8	0,3	40
			12K2R030A- 12SRC12	f _z	0,2				
			Pramet	v _c	350				
5.	Hybridní	77	Stopková čelní válcová fréza ø 8 mm s R1	n	7957	0,5	0,5	0,1	40
			2S21-0600 100- NG H10F	f _z	0,05				
			Sandvik	v _c	250				

V prvním operačním úseku bude probíhat vysokorychlostní hrubování. Pro tento operační úsek je nejvhodnější válcová čelní fréza velkého průměru, z důvodu velkého úběru materiálu za krátký čas. Proto bude u tohoto operačního úseku použita válcová čelní fréza $\varnothing 44$ mm od firmy Sandvik s obchodním označením 490-044C4-14H. V tomto operačním úseku bude vyhrubován základní profil tvárníku.

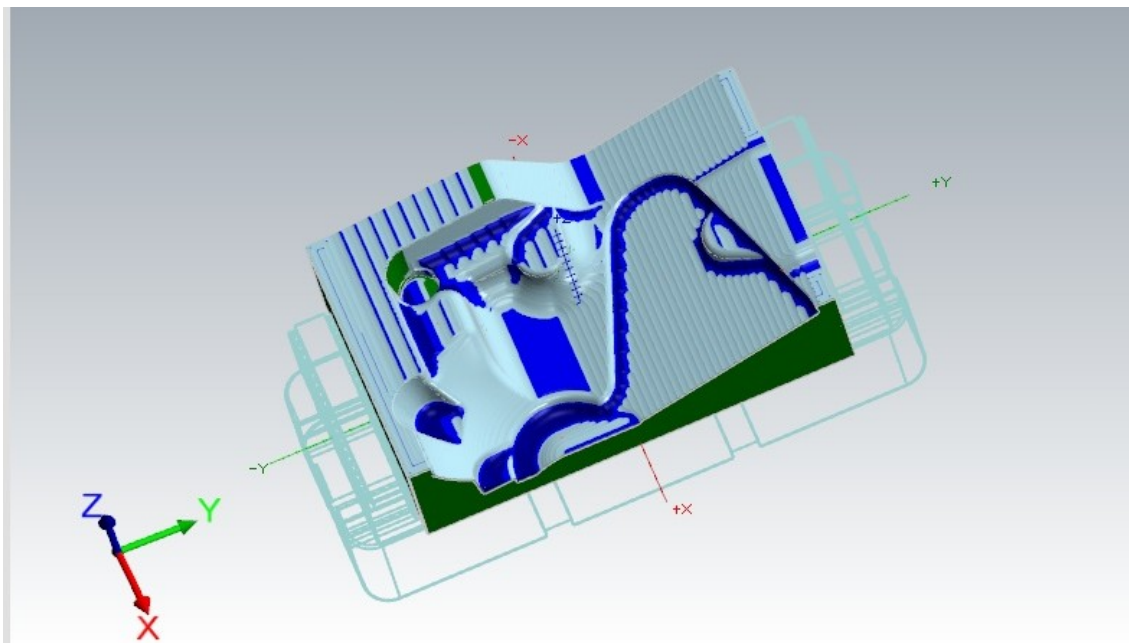


Obr. 19 Válcová čelní fréza $\varnothing 44$ mm [16]

Ve druhém, třetím a čtvrtém operačním úseku bude probíhat vysokorychlostní zbytkové hrubování. U těchto operačních úseků budou postupně použity tři frézy s různými průměry. Při druhém operačním úseku bude použita válcová čelní fréza s VBD $\varnothing 20$ mm od firmy Sandvik s obchodním označením R390-020 EH20-07M. Při třetím operačním úseku bude použita stopková kulová fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami $\varnothing 16$ mm od firmy Pramet s obchodním označením 16K2R035A-16SRC12. A nakonec při čtvrtém operačním úseku bude použita stopková kulová fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami $\varnothing 12$ mm od firmy Pramet s obchodním označením 12K2R030A-12SRC12. Při třetím a čtvrtém operačním úseku by bylo vhodnější použít nástroje od firmy Sandvik, pro které jsou vyráběny vyměnitelné břitové destičky určené k frézování hliníkových slitin, ale z důvodu vysoké pořizovací ceny a malé využitelnosti těchto nástrojů při potřebách laboratoře obrábění Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie nebyla tato fréza zakoupena. Proto byly použity již uvedené frézy od firmy Pramet, které nejsou primárně určeny k obrábění hliníkových slitin.

V pátém operačním úseku bude probíhat vysokorychlostní hybridní hrubování. Pro tuto operaci byla zvolena stopková válcová čelní fréza $\varnothing 8$ mm s R1 od firmy Sandvik s obchodním označením 2S21-0600 100-NG H10F.

Po provedení operačních úseků zařazených do skupiny hrubování, bude tvárník obroben s přídky pro další obrábění. V obrázku 20, který je vygenerován softwarem Mastercam, lze vidět velikosti přídků na jednotlivých plochách.



Obr. 20 Velikost přídků po provedení skupiny hrubovacích operačních úseků

Tab. 5 Legenda velikostí přídků pro obrázek 20

	Rozsah	
Barva	Od [mm]	Do [mm]
	1,016	Max
	0,508	1,016
	0,254	0,508
	-0,254	0,254
	-0,508	-0,254
	-1,016	-0,508
	Min	-1,016

2.5.2 Pro předdokončování

Tab. 6 Seznam nástrojů a řezných podmínek pro předdokončování tvárníku

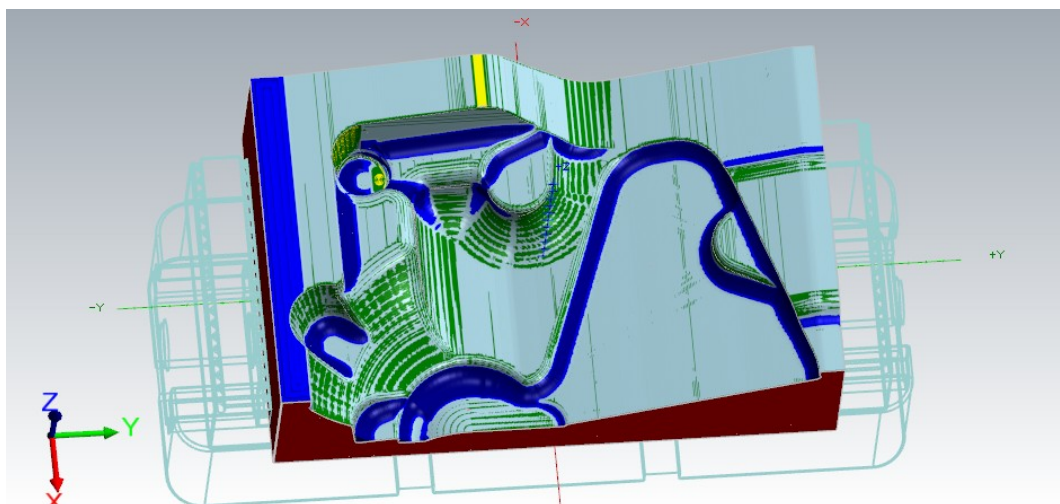
Úsek číslo	Strategie	Číslo nástroje	Nástroj	Otáčky n [min ⁻¹]		Axiální hloubka řezu a _p [mm]	Radiální hloubka řezu a _e [mm]	Přídavek [mm]	Vyložení nástroje [mm]
			Označení	Posuv na zub f _z [mm]					
			Výrobce	Řezná rychlost v _c [m·min ⁻¹]					
6.	Z-průřezy	161	Stopková kulová fréza s VBD ø 12 mm	n	9283	0,5	-	0,2	40
			12K2R030A- 12SRC12	f _z	0,2				
			Pramet	v _c	350				
7.	Řádkování	161	Stopková kulová fréza s VBD ø 12 mm	n	9283	-	0,5	0,2	40
			12K2R030A- 12SRC12	f _z	0,2				
			Pramet	v _c	350				

V šestém operačním úseku bude probíhat vysokorychlostní frézování strategií Z-průřezy. Pro tento operační úsek byla zvolena stopková kulová fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami $\varnothing 12 \text{ mm}$ od firmy Pramet s obchodním označením 12K2R030A-12SRC12.

Pro sedmý operační úsek, ve kterém probíhá frézování strategií vysokorychlostní řádkování, bude použita opět stopková kulová fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami $\varnothing 12 \text{ mm}$ od firmy Pramet s obchodním označením 12K2R030A-12SRC12.

U těchto operačních úseků opět platí, že kdyby se použil již výše uvedený nástroj od firmy Sandvik, dosáhlo by obrábění lepších výsledných parametrů.

Po provedení operačních úseků zařazených do skupiny předdokončování, bude tvárník obroben s přídavky pro další obrábění. V obrázku 21, který je vygenerován softwarem Mastercam, lze vidět velikosti přídavků na jednotlivých plochách.



Obr. 21 Velikost přídavků po provedení skupiny předdokončovacích operačních úseků

Tab. 7 Legenda velikostí přídavků pro obrázek 21

Barva	Rozsah	
	Od [mm]	Do [mm]
Dark Blue	0,5	Max
Blue	0,3	0,5
Light Blue	0,2	0,3
Green	0,1	0,2
Yellow	0	0,1
Red	-0,1	0
Dark Red	Min	-0,1

2.5.3 Pro dokončení

Tab. 8 Seznam nástrojů a řezných podmínek pro dokončování tvárníku

Úsek číslo	Strategie	Číslo nástroje	Nástroj	Otáčky n [min ⁻¹]		Axiální hloubka řezu a _p [mm]	Radiální hloubka řezu a _e [mm]	Přídavek [mm]	Vyložení nástroje [mm]
			Označení	Posuv na zub f _z [mm]					
			Výrobce	Řezná rychlost v _c [m·min ⁻¹]					
8.	Z-průřezy	169	Stopková monolitní kulová fréza ø 6 mm	n	17000	0,15	-	0	55
			R216.42-06030- AP066 1620	f _z	0,2				
			Sandvik	v _c	320				
9.	Řádkování	169	Stopková monolitní kulová fréza ø 6 mm	n	17000	-	0,15	0	55
			R216.42-06030- AP066 1620	f _z	0,2				
			Sandvik	v _c	320				
10.	Spirála	167	Stopková monolitní kulová fréza ø 4 mm	n	16000	-	0,1	0	35
			R216.42-04030- AK08A H10F	f _z	0,05				
			Sandvik	v _c	201				
11.	Drsnost	167	Stopková monolitní kulová fréza ø 4 mm	n	16000	-	0,05	0	35
			R216.42-04030- AK08A H10F	f _z	0,05				
			Sandvik	v _c	201				

Pro osmý operační úsek, ve kterém probíhá vysokorychlostní frézování strategií Z-průřezy, bude použita kulová monolitní fréza $\varnothing 6 \text{ mm}$ od firmy Sandvik s obchodním označením R216.42-06030-AP066 1620.



Obr. 22 Kulová fréza \varnothing 6 mm od firmy Sandvik [17]

Při devátém operačním úseku bude probíhat vysokorychlostní frézování strategií řádkování. Pro tento operační úsek bude použita opět kulová monolitní fréza \varnothing 6 mm od firmy Sandvik s obchodním označením R216.42-06030-AP066 1620. Tato fréza byla zakoupena přímo za účelem frézování tvárníku a její geometrie břitů je určena k frézování hliníkových slitin.

Při desátém operačním úseku bude provedeno vysokorychlostním frézováním strategií spirála. Při tomto operačním úseku bude použita kulová monolitní fréza \varnothing 4 mm od firmy Sandvik s obchodním označením R216.42-04030-AK08A H10F.

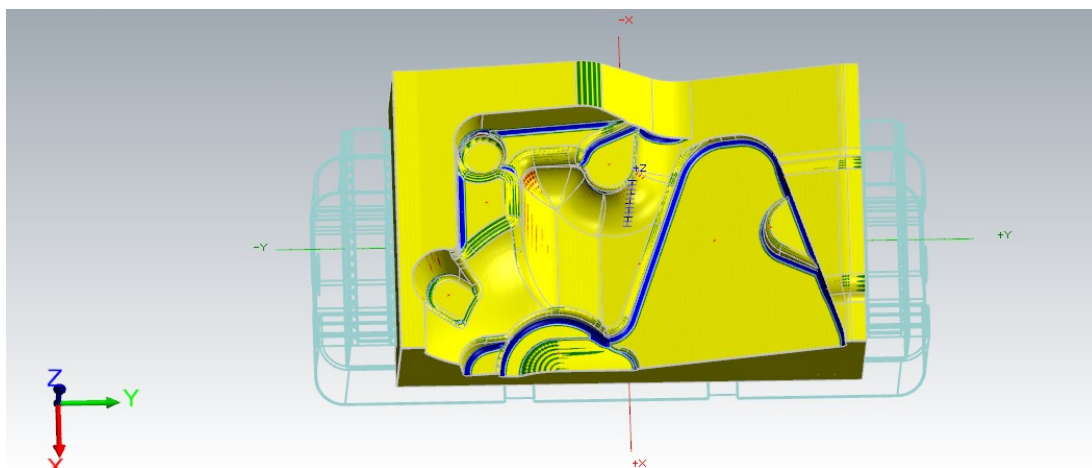


Obr. 23 Kulová fréza \varnothing 4 mm od firmy Sandvik [18]

Při jedenáctém operačním úseku bude využita frézovací strategie drsnost. Pro tento operační úsek bude použita opět kulová monolitní fréza \varnothing 4 mm od firmy Sandvik s obchodním označením R216.42-04030-AK08A H10F. Tato fréza byla také zakoupena za účelem frézování tvárníku a její břity mají geometrii uzpůsobenou pro obrábění hliníkových slitin.

Po provedení všech operačních úseků zařazených do skupiny pro dokončování tvárníku bude tvárník téměř dokončen. Na obrázku 24 lze vidět model vygenerovaný

softwarem Mastercam, s barevným rozlišením odchylek rozměrů na plochách od požadovaných rozměrů modelu. Na obrázku lze vidět, že v koutech tvárníku stále zůstanou velké přídavky materiálu, které budou odstraněny následující skupinou operačních úseků.



Obr. 24 Velikost přídavků po provedení skupiny dokončovacích operačních úseků

Tab. 9 Legenda velikostí přídavků pro obrázek 24

Barva	Rozsah	
	Od [mm]	Do [mm]
Dark Blue	0,4	Max
Blue	0,2	0,4
Light Blue	0,1	0,2
Green	0,02	0,1
Yellow	-0,05	0,02
Red	-0,1	-0,05
Dark Red	Min	-0,1

2.5.4 Pro zbytkové dokončení

Další operační úseky byly zařazeny do skupiny pro zbytkové dokončování. Těmito operačními úseky budou obrobena zbývající přídavky materiálu v koutech tvárníku.

Tab. 10 Seznam nástrojů a řezných podmínek pro zbytkové dokončení tvárníku

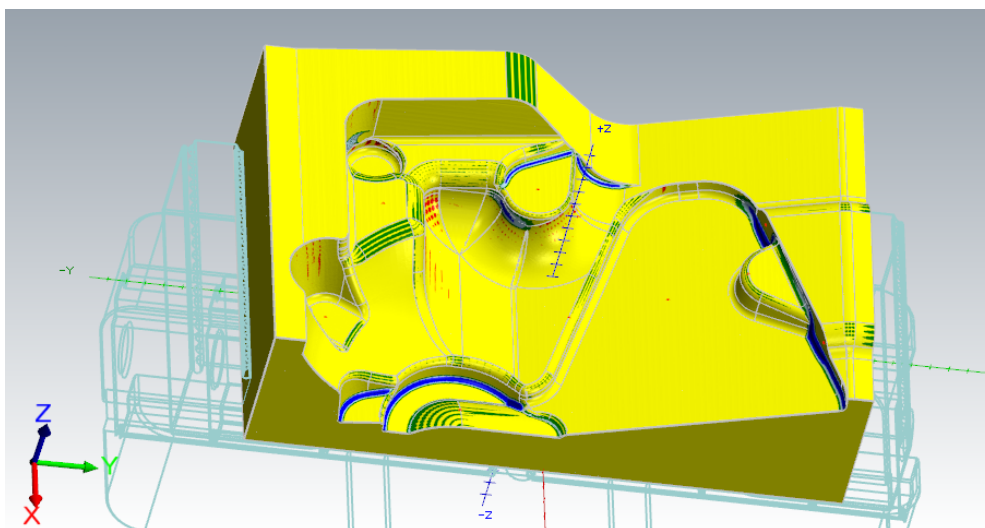
Úsek číslo	Strategie	Číslo nástroje	Nástroj	Otáčky n [min ⁻¹]		Axiální hloubka řezu a _p [mm]	Radiální hloubka řezu a _e [mm]	Přídavek [mm]	Vyložení nástroje [mm]
	Obráběné plochy		Označení	Posuv na zub f _z [mm]					
			Výrobce	Řezná rychlost v _c [m·min ⁻¹]					
12.	Spirála	77	Stopková čelní válnová fréza ø 8 mm s R1	n	17000	-	0,2	0	40
	1. dutina		2S21-0600 100-NG H10F	f _z	0,05				
			Sandvik	v _c	427				
13.	Tužkové	167	Stopková monolitní kulová fréza ø 4 mm	n	17000	-	0,1	0	35
	Kouty, zaoblení		R216.42- 04030-AK08A H10F	f _z	0,05				
			Sandvik	v _c	214				
14.	2D zkosení	3	Stopková fréza na sražení ø 12 mm	n	6366	0,05	0,05	0	40
	Zkosení hrany horní plochy		Srážeč D12	f _z	0,1				
			Sandvik	v _c	200				

Ve dvanáctém operačním úseku bude probíhat vysokorychlostní frézování strategií spirála. U tohoto operačního úseku bude použita stopková válková monolitní fréza $\varnothing 8 \text{ mm}$ s R1 od firmy Sandvik s obchodním označením 2S21-0600 100-NG H10F.

Při třináctém operačním úseku proběhne vysokorychlostní obrábění tužkovou strategií. Pro tento operační úsek bude použita kulová monolitní fréza $\varnothing 4 \text{ mm}$ s řeznou geometrií břitů určenou pro obrábění hliníkových slitin. Fréza je od firmy Sandvik s obchodním označením R216.42-04030-AK08A H10F.

Při posledním čtrnáctém operačním úseku proběhne sražení hran strategií 2D zkosení. Při tomto operačním úseku bude použita fréza na sražení hran $\varnothing 10 \text{ mm}$ od firmy Sandvik.

Po provedení všech operačních úseků by měl být tvárník obroben na požadované rozměry. Na porovnávacím modelu vygenerovaném softwarem Mastercam lze vidět, že povrch tvárníku bude téměř celý obroben. Nedostatečné obrobení lze vidět v modře označených zaobleních, které nejsou obrobena z důvodu nepoužití kulové frézy o průměru 2 mm. Použitá fréza se totiž nedokáže do tak malého prostoru dostat.



Obr. 25 Velikost přídavků po provedení skupiny zbytkových dokončovacích operačních úseků

Tab. 11 Legenda velikostí přídavků pro obrázek 25

Barva	Rozsah	
	Od [mm]	Do [mm]
Dark Blue	0,4	Max
Blue	0,2	0,4
Light Blue	0,1	0,2
Green	0,02	0,1
Yellow	-0,05	0,02
Red	-0,1	-0,05
Dark Red	Min	-0,1

2.6 Zhodnocení návrhů použitých při experimentu

2.6.1 Rozměrová přesnost

Po každé výrobě jakékoli součásti, je potřeba tuto součást změřit a tím zkontrolovat, zdali součást odpovídá navrženým rozměrům.

Tato kontrola může být provedena různými způsoby. Za nejzákladnější kontrolu při obrábění tvarových součástí může být považováno teoretické porovnání obrobku s modelem pomocí CAM programů. Na tomto porovnání lze vidět teoretické odchylky od požadovaných rozměrů vyjádřené barevnou škálou. Tato kontrola však nemůže být využita jako výstupní, jelikož se může z důvodu nepřesností při výrobě razantně lišit od skutečného obrobku. Proto se tato kontrola uvádí pouze jako informativní. [6]

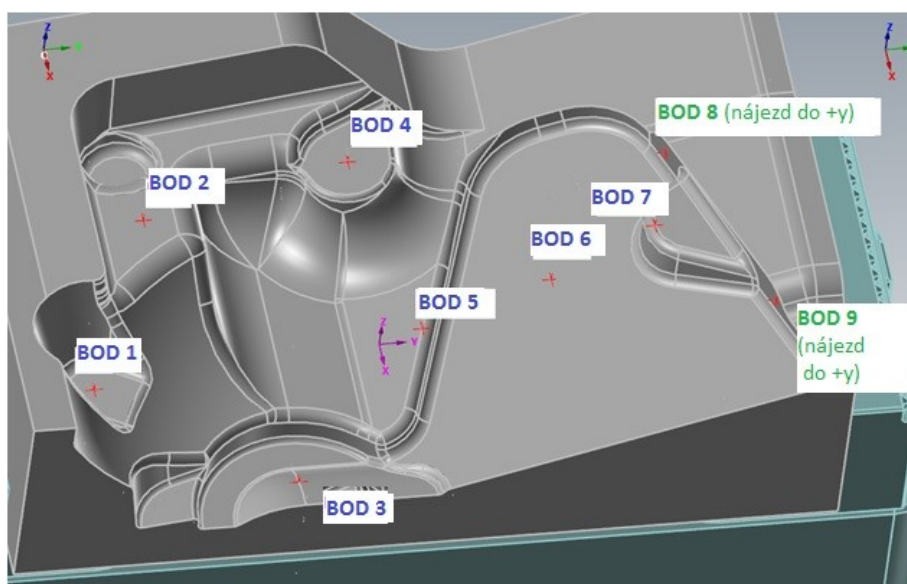
Další možností kontroly je proměření součásti přímo na obráběcím stroji pomocí dotykové sondy. Tato kontrola je již prováděna přímo na hotovém obrobku, a proto ji lze použít jako výstupní kontrolu. Měření dotykovou sondou lze provádět buď ručně, bod po bodu, nebo lze vytvořit program, který by řídil pohyby sondy. Avšak někdy může být požadováno proměření obrobku jiným strojem, než kterým byl vyroben. Pokud totiž probíhá výroba i měření součásti na jednom stroji, může být měření zkresleno například vůlemi při chodu stroje. [19, 20]

Proto za další možnost pro proměření obrobku je považováno použití externího měřicího přístroje. Pomocí tohoto stroje může být obrobek proměřen nezávisle na výrobním stroji. Externím měřicím přístrojem může být například 3D skener, souřadnicový měřicí přístroj nebo jiné. [20]

Pro proměření tvárníku byla vybrána metoda měření přímo na obráběcím stroji pomocí dotykové sondy. Na obrázku 26 lze vidět umístění měřených bodů na modelu tvárníku. Ve stejných bodech bude následně tvárník také proměřen na externím měřicím přístroji.

Tab. 12 Souřadnice měřených bodů

Číslo bodu	Osa měření	Souřadnice [mm]		
		X	Y	Z
1.	Z	25.245	-62.121	23.171
2.	Z	-3.085	-48.832	38.201
3.	Z	43.238	-24.582	12,770
4.	Z	-17.78	-6.045	33.202
5.	Z	14.044	3.894	20.369
6.	Z	7.121	29.914	23.676
7.	Z	7.223	48.699	37.487
8.	Y	-11.333	54.193	36.677
9.	Y	30.601	67.722	40.846



Obr. 26 Vyobrazení měřících bodů na modelu tvárníku

MĚŘÍCÍ PROGRAM PRO DOTYKOVOU SONDU

Pro kontrolu rozměrů tvárníku v zadaných bodech na stroji DMU50 byly dvě možnosti:

1. Jednou z možností bylo pomocí ručního ovládání zadat sondě postupně jednotlivé souřadnice a v těch změřit daný rozměr tvárníku.
2. Tato možnost je však velice zdoluhavá, a proto byla využita druhá možnost – napsání programu pro měřící sondu. Tímto se kontrola tvárníku téměř zautomatizovala.

Řídicí program (NC program) byl napsán v programovacím jazyku DIALOG určeného pro řídicí systém Heidenhain. Psaní programu probíhalo přímo v řídicím systému Heidenhain iTNC 530 a pracuje na principu opakování měřících cyklů sondy. Podklady pro napsání programu byly čerpány z literatury [21, 22].

Součástí programu je také tabulka, ve které jsou uvedeny souřadnice měřených bodů, a do které systém také zapisuje naměřené hodnoty a odchylky naměřených hodnot od zadaných.

Samotný řídicí program s popisem příkazů je uveden v tabulce 13.

Tab. 13 Program měřící sondy – část 1/2

0 BEGIN PGM program-sondy-test MM	Začátek programu
1 BLK FORM 0.1 Z X+0 Y+0 Z+0	
2 BLK FORM 0.2 X+160 Y+100 Z+50	
3 FN 26: TABOPEN TNC:\TVARNIK-NCDATA\ \PROGRAMSONDY\TVARNIK.TAB	Otevření tabulky TVARNIK.TAB
4 TOOL CALL 98 Z	Vyvolání sondy
5 L Z+100 R0 FMAX	Najetí do výšky dané výšky
6 Q28 = 0	Vynulování Q parametrů
7 Q160 = 0	
8 CALL LBL 2	Vyvolání podprogramu č. 2
9 LBL 2	Podprogram 2 - Měření v ose Z
10 FN 28: TABREAD Q50 =Q28 /"X"	Načtení souřadnic bodů do jednotlivých Q parametrů Hodnota parametru Q28 určuje číslo řádku tabulky
11 FN 28: TABREAD Q51 =Q28 /"Y"	
12 FN 28: TABREAD Q52 =Q28 /"Z"	
13 TCH PROBE 427 MEASURE COORDINATE ~	Načtení měřícího cyklu sondy
Q263=+Q50 ;1ST POINT 1ST AXIS ~	Načtení souřadnice v ose X
Q264=+Q51 ;1ST POINT 2ND AXIS ~	Načtení souřadnice v ose Y
Q261=+Q52 ;MEASURING HEIGHT ~	Načtení souřadnice v ose Z
Q320=+10 ;SET-UP CLEARANCE ~	Bezpečná vzdálenost
Q272=+3 ;MEASURING AXIS ~	Měření v ose Z
Q267=-1 ;TRAVERSE DIRECTION ~	Měření v záporném směru osy
Q260=+100 ;CLEARANCE HEIGHT ~	Bezpečná výška
Q281=+1 ;MEASURING LOG ~	Vygenerování měřícího protokolu
Q288=+0 ;MAXIMUM LIMIT ~	Nastavení tolerance
Q289=+0 ;MINIMUM LIMIT ~	Nastavení tolerance
Q309=+0 ;PGM STOP TOLERANCE ~	Zastavení programu při chybě - NE

Tab. 13 Program měřicí sondy – část 2/2

Q330=+0 ;TOOL	Nástroj
14 Q2 = Q160 - Q52	Výpočet odchylky od požadované hodnoty
15 FN 27: TABWRITE Q28 /"Z_MERENI" = Q160	Zápis naměřené hodnoty do tabulky
16 FN 27: TABWRITE Q28 /"ODCHYLKA" = Q2	Zápis odchylky do tabulky
17 Q28 = Q28 + 1	Posunutí na další řádek tabulky
18 FN 11: IF +Q28 GT +6 GOTO LBL 3	Pokud je nové číslo řádku větší než 6, pokračuj na podprogram 3
19 FN 9: IF +Q28 EQU +Q28 GOTO LBL 2	Jestliže se číslo řádku rovná s číslem řádku, pokračuj zpět na podprogram 2
20 LBL 3	Podprogram 3 - měření v ose Y
21 FN 28: TABREAD Q50 =Q28 /"X"	Načtení souřadnic bodů do jednotlivých Q parametrů Parametr Q28 obsahuje číslo aktuálního řádku tabulky
22 FN 28: TABREAD Q51 =Q28 /"Y"	
23 FN 28: TABREAD Q52 =Q28 /"Z"	
24 TCH PROBE 427 MEASURE COORDINATE ~	Načtení měřícího cyklu sondy
Q263=+Q50 ;1ST POINT 1ST AXIS ~	Načtení souřadnice v ose X
Q264=+Q51 ;1ST POINT 2ND AXIS ~	Načtení souřadnice v ose Y
Q261=+Q52 ;MEASURING HEIGHT ~	Načtení souřadnice v ose Z
Q320=+10 ;SET-UP CLEARANCE ~	Bezpečná vzdálenost
Q272=+2 ;MEASURING AXIS ~	Měření v ose Z
Q267=+1 ;TRAVERSE DIRECTION ~	Měření v záporném směru osy
Q260=+100 ;CLEARANCE HEIGHT ~	Bezpečná výška
Q281=+1 ;MEASURING LOG ~	Vygenerování měřícího protokolu
Q288=+0 ;MAXIMUM LIMIT ~	Tolerance
Q289=+0 ;MINIMUM LIMIT ~	Tolerance
Q309=+0 ;PGM STOP TOLERANCE ~	Stop programu při chybě - NE
Q330=+0 ;TOOL	Nástroj
25 Q2 = Q160 - Q51	Výpočet odchylky od požadované hodnoty
26 FN 27: TABWRITE Q28 /"Y_MERENI" = Q160	Zápis naměřené hodnoty do tabulky
27 FN 27: TABWRITE Q28 /"ODCHYLKA" = Q2	Zápis odchylky do tabulky
28 Q28 = Q28 + 1	Posunutí na další řádek tabulky
29 FN 11: IF +Q28 GT +8 GOTO LBL 4	Pokud je nové číslo řádku větší než 8, pokračuj na podprogram 4
30 FN 9: IF +Q28 EQU +Q28 GOTO LBL 3	Jestliže se číslo řádku rovná s číslem řádku, pokračuj zpět na podprogram 3
31 LBL 4	Podprogram 4 - ukončení programu
32 END PGM program-sondy-test MM	Ukončení celého programu

Na obrázku 27 je uveden náhled použité tabulky, ze které jsou programem načítány souřadnice měřených bodů a následně také zapisovány naměřené hodnoty a odchylky od zadaných hodnot.

File: TVARNIK.TAB						
NR	X	Y	Z	Z_MERENI	Y_MERENI	ODCHYLKA
0	+25.2450	-62.1200	+23.1710			
1	-3.0850	-48.8320	+38.2010			
2	+43.2380	-24.5820	+12.7700			
3	-17.7800	-6.0450	+33.2020			
4	+14.0440	+3.8940	+20.3690			
5	+7.1210	+29.9140	+23.6790			
6	+7.2230	+48.6990	+37.4870			
7	-11.3330	+54.1930	+36.6770			
8	+30.6010	+67.7220	+40.8460			
[END]						

Obr. 27 Tabulka k programu sondy v řídicím systému Heidenhain iTNC 530

Struktura programu je napsána tak, aby mohl být po drobných úpravách v budoucnu použit i pro měření jiných součástí. Drobnými úpravami je myšlena změna souřadnic měřených bodů v tabulce, a pokud by byly přidány nebo odebrány některé měřicí body, je potřeba přepsat v programu řádky č. 18, 19, 29, a 30, které určují opakovatelnost měření v dané ose pro zadaný počet bodů.

NAMĚŘENÉ HODNOTY

Měření tvárníku proběhlo z důvodu eliminování chyby měření třikrát. Pro každý naměřený bod byl vypočítán průměr z naměřených hodnot. Potřebná data jsou uvedena v tabulce 14.

Tab. 14 Naměřené hodnoty a výpočet jejich průměru

Číslo měřeného bodu	Měření č. 1 [mm]	Měření č. 2 [mm]	Měření č. 3 [mm]	Průměr (x) [mm]
1.	23,1497	23,1514	23,1467	23,1493
2.	38,1828	38,1852	38,1805	38,1828
3.	12,8436	12,8456	12,8413	12,8435
4.	33,1823	33,1840	33,1796	33,1820
5.	20,3698	20,3721	20,3669	20,3696
6.	23,7739	23,7762	23,7718	23,7740
7.	37,4661	37,4682	37,4642	37,4662
8.	53,6264	53,6272	53,6271	53,6269
9.	67,1594	67,1602	67,1612	67,1603

$$x_k = \frac{\sum_{i=1}^j x_i}{j} \quad (1)$$

$$x_1 = \frac{23,1497 + 23,1514 + 23,1467}{3}$$

$$x_1 = 23,1493 \text{ mm}$$

Průměry dalších měřených bodů byly vypočítány pomocí programu Microsoft Excel a jsou uvedeny v tabulce 14.

Následně bude tvárník proměřen ve stejných bodech i na souřadnicovém měřicím přístroji Wenzel LH65 X3M. V tabulce 15 bude uvedeno porovnání požadovaných a skutečných naměřených hodnot, získaných měřením na obráběcím stroji i na souřadnicovém měřicím stroji.

Tab. 15 Požadované a skutečné hodnoty naměřené na tvárníku

Měřený bod	Měřená souřadnice v ose	Požadovaná hodnota [mm]	Naměřená hodnota na obráběcím stroji [mm]	Odchylka [mm]	Naměřená hodnota na souřadnicovém měřicím stroji [mm]	Odchylka [mm]	Rozdíl [mm]
1.	Z	23,1710	23,1493	-0,0217			
2.	Z	38,2010	38,1828	-0,0182			
3.	Z	12,7700	12,8435	0,0735			
4.	Z	33,2020	33,1820	-0,0200			
5.	Z	20,3690	20,3696	0,0006			
6.	Z	23,6790	23,7740	0,0950			
7.	Z	37,4870	37,4662	-0,0208			
8.	Y	54,1930	53,6269	0,5661			
9.	Y	67,7220	67,1603	0,5617			

Výpočet odchylky pro souřadnice měřené v ose Z:

$$\text{odchylka} = \text{naměřená hodnota} - \text{požadovaná hodnota} \quad (2)$$

$$\text{odchylka pro 1. bod} = 23,1493 - 23,1710$$

$$\text{odchylka po 1. bod} = -0,0217 \text{ mm}$$

Výpočet odchylky pro souřadnice měřené v ose Y:

$$\text{odchylka} = \text{požadovaná hodnota} - \text{naměřená hodnota} \quad (3)$$

$$\text{odchylka pro 8. bod} = 54,1930 - 53,6269$$

$$\text{odchylka pro 8. bod} = 0,5661 \text{ mm}$$

Zbývající odchylky byly vypočítány pomocí programu Microsoft Excel a jsou uvedeny v tabulce 15.

Rozměry naměřené souřadnicovým měřicím přístrojem nejsou v tabulce uvedeny, protože toto měření nebylo předmětem této bakalářské práce a bude doplněno až v budoucnu.

Z tabulky 15 vyplývá, že tvárník je v bodech 1 – 7 vyroben s přesností v setinách milimetru. Pro výukové účely Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie je tato přesnost dostačující.

U bodů č. 8 a 9 byl tvárník měřen v ose Y a byla naměřena odchylka 0,5 mm směrem do kladných hodnot, z čehož vyplývá, že v těchto bodech není tvárník zcela obroben. Tato skutečnost je způsobena 3osým obráběním. Plocha, na které se oba body nachází, má být vyrobena s úkosem, kterého však bude dosaženo jedině 5osým obráběním.

2.6.2 Strojní čas

CAM systémy nejenže pomáhají při programování CNC strojů, pomáhají také určovat strojní čas potřebný pro provedení potřebného operačního úseku. Tento strojní čas však nikdy nebude přesně odpovídat skutečnému času potřebnému pro provedení daného operačního úseku. Systémy CAM totiž počítají s posuvem zadaným při programování. V praxi však stroj má určité zpoždění. Zpoždění je způsobeno vlivy, jako jsou například zrychlení posuvu na požadovanou hodnotu a rychlost řídicího systému číst řádky programu. Proto se při určování strojních časů využívají koeficienty časů potřebných pro obrábění. Tento koeficient přibližně upravuje délku vypočítaného času systémem CAM na čas skutečný. Určení tohoto koeficientu nejčastěji probíhá pro daný stroj a danou skupinu obráběcích operačních úseků. Pro každou skupinu operačních úseků totiž může být tento koeficient rozdílný, a pokud by byl pro každý stroj pouze jeden celkový koeficient, výpočet času by byl vysoce nepřesný. [23]

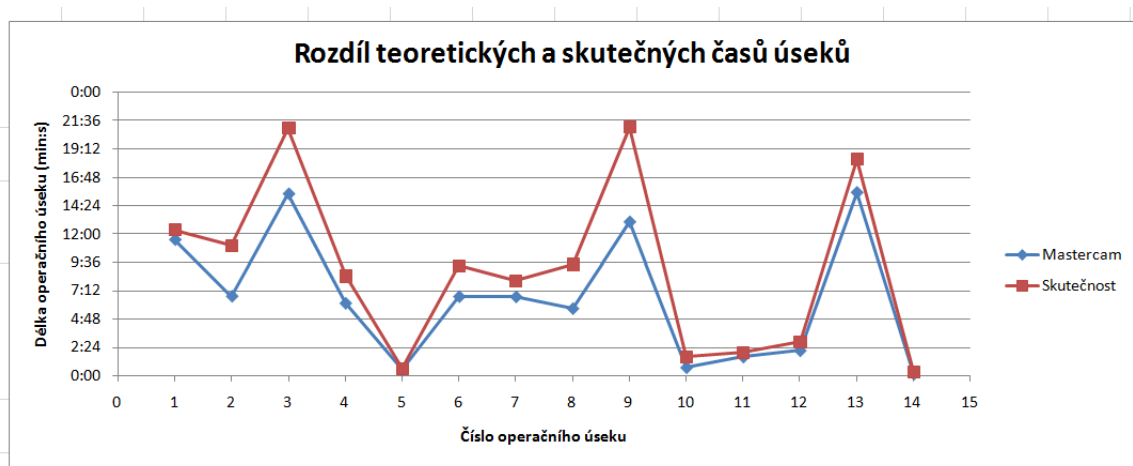
Při frézování tvárníku byly měřeny skutečné časy obrábění za účelem zjistit časový koeficient pro spojení součásti tvárníku, softwaru Mastercam a použitého stroje DMU50.

Tab. 16 Teoretické a skutečné časy jednotlivých operačních úseků

Číslo operačního úseku	Operační úsek	Čas dle CAM systému Mastercam [min:s]	Skutečný naměřený čas [min:s]
1.	Vysokorychlostní hrubování (ø 44 mm)	11:33	12:20
2.	Vysokorychlostní zbytkové hrubování (ø 20 mm)	6:45	11:02
3.	Vysokorychlostní zbytkové hrubování (ø 16 mm)	15:26	20:58
4.	Vysokorychlostní zbytkové hrubování (ø 12 mm)	6:09	8:28
5.	Vysokorychlostní hybridní hrubování (ø 10 mm)	0:29	0:34
6.	Vysokorychlostní Z-průřezy (ø 12 mm)	6:43	9:18
7.	Vysokorychlostní řádkování (ø 12 mm)	6:43	8:05
8.	Vysokorychlostní Z-průřezy (ø 6 mm)	5:42	9:25
9.	Vysokorychlostní řádkování (ø 6 mm)	13:03	21:03
10.	Vysokorychlostní spirála (ø 4 mm)	0:42	1:35
11.	Vysokorychlostní drsnost (ø 4 mm)	1:36	1:58
12.	Vysokorychlostní spirála (ø 4 mm)	2:08	2:52
13.	Vysokorychlostní tužkové (ø 4 mm)	15:33	18:22
14.	2D zkosení	0:09	0:20
	Celkový čas	92:41	126:20

Výpočet koeficientu strojního času (k_t):

$$k_t = \frac{\text{Celkový skutečný čas}}{\text{Celkový teoretický čas}} = \frac{92,68}{126,33} = 1,36 \quad (4)$$



Obr. 28 Porovnání teoretického a skutečného strojního času

Na obrázku 28 lze vidět, že časové ztráty stroje se opravdu projevují. U některých operací více, u jiných zase méně. Společným znakem všech naměřených časů je však to, že jsou vždy o něco vyšší, než teoretické časy vypočítané softwarem Mastercam.





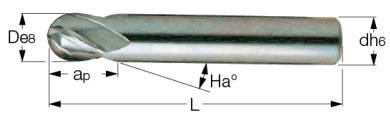
Výpočtem byl zjištěn koeficient strojního času pro úpravu teoretického strojního času $k_t = 1,36$.

Tento koeficient strojního času je pouze orientační a nemusí vždy platit. Platí pro frézování tvárníku při použití stejných frézovacích strategiích, řezných podmínek, stejného stroje a softwaru Mastercam. Při změně jakékoli z těchto podmínek, bude koeficient strojního času jiný.

2.6.3 Návrh pro zlepšení

Zlepšení procesu obrábění tvárníku lze provést použitím jiných řezných nástrojů. V tabulce 17 je uveden soupis nástrojů, které by mohly být použity v budoucnu při obrábění tvárníku.

Tab. 17 Návrh nových nástrojů

Pro úsek č.	Nástroj	Označení	Výrobce	Vyobrazení nástroje
2	Kulová fréza s VBD ø 20 mm	R216F-20A25C-115	Sandvik	
3	Kulová fréza s VBD ø 16 mm	R216F-16A16C-063	Sandvik	
4, 6, 7	Kulová fréza s VBD ø 12 mm	R216F-12A16C-085	Sandvik	
13	Kulová monolitní fréza ø 2 mm	R216.42-02030-AK30G 1620	Sandvik	
13	Kulová monolitní fréza ø 2 mm	5650793	Iscar	

Pro operační úseky, které nejsou v tabulce 17 uvedeny (1, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15) je doporučeno ponechat stávající nástroje.

Jak již vyplynulo z předcházejících kapitol, nákupem kulové stopkové frézy velmi malého průměru by tvárník dosáhl přesnějších požadovaných rozměrů i v prozatím nepřístupných koutech a zaobleních, které z důvodu použití kulové stopkové frézy o ø 4 mm nebyly dokonale obrobena. Pro dokonalé obrobění by mohla postačit stopková kulová fréza o ø 2 mm. Navržené kulové frézy ø 2 mm jsou uvedeny v tabulce 17.

Další zlepšení by samozřejmě vzniklo použitím kulových fréz s vyměnitelnými břitovými destičkami, s řeznou geometrií použitelnou pro hliníkové slitiny při hrubovacích operačních úsecích. Tyto frézy jsou uvedeny také v tabulce 17.

Při použití těchto kulových fréz by však nastal ještě jeden problém, a tím by byla nemožnost dosáhnout doporučené řezné rychlosti (okolo $300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) s dosavadním frézovacím centrem DMU 50. Při frézování hliníkových slitin kulovými frézami o takhle malých průměrech jsou totiž potřeba vysoké otáčky vřetena stroje, které dosavadní frézovací centrum DMU 50 nedokáže vyvinout. Doporučené otáčky pro tyto frézy se pohybují v závislosti na použité řezné rychlosti okolo $50\,000 \text{ min}^{-1}$. [24]

Nákup nového frézovacího CNC stroje však není prozatím v budoucích vyhlídkách při rozšiřování laboratoří obrábění Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie, a proto by se při použití těchto kulových fréz využívaly maximální možné otáčky stávajícího frézovacího centra DMU 50, které jsou $18\,000 \text{ min}^{-1}$.

Pro obrobení zkosené boční plochy, u které byl při měření naměřen zůstatkový materiál, bude nutné použít 5osé obrábění. Plocha je zkosená pod záporným úhlem, což znamená, že při běžném 3osém obrábění se nástroj nemůže dostat do podřezaného koutu.

ZÁVĚR

Hlavním úkolem bakalářské práce bylo vyrobit tvarový díl, nazývaný tvárník, v jednotlivých fázích výroby a vytvořit k nim informační karty popisující postup výroby v jednotlivých fázích. Tomuto úkolu předcházelo navržení nástrojů a strategií potřebných pro výrobu tvárníku.

V teoretické části byly rozebrány pojmy týkající se frézování tvarových ploch pomocí CAM systémů. Byly vysvětleny pojmy jako tvarová plocha, CAM software a další.

Experimentální část se již zabývala výrobou samotného tvárníku. Nejdříve byly navrženy obráběcí strategie pomocí softwaru Mastercam. Následně proběhl návrh nástrojů, kterými se bude tvárník obrábět. Po této části již mohl být tvárník vyroben. Výroba tvárníku probíhala v laboratořích obrábění Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie.

Po obrobení tvárníku proběhlo jeho měření v zadaných bodech. První měření proběhlo přímo na obráběcím stroji DMU 50 pomocí měřicí dotykové obrobkové sondy. Pro toto měření byl napsán řídicí program (NC program), který automaticky proměří obrobek ve všech zadaných bodech. Tento program byl napsán tak, aby mohl být Katedrou obrábění, montáže a strojírenské metrologie používán i v budoucnu pro měření jiných součástí s jinými kontrolními body.

Druhé měření proběhne na souřadnicovém měřicím stroji Wenzel LH65 X3M, který katedra také vlastní. Avšak toto měření nebylo součástí této práce, a proto nejsou v práci uvedeny naměřené hodnoty. Tyto hodnoty budou doplněny až v budoucnu.

Při výrobě tvárníku byly také měřeny skutečné strojní časy pro jednotlivé úseky frézovací operace. Pomocí těchto časů byl následně vypočítán koeficient strojního času pro úpravu strojního času vypočítaného pomocí softwaru Mastercam. Výsledný koeficient strojního času pro frézovací centrum DMU 50 při výrobě tvárníku je $k_t = 1,36$.

Na závěr byly navrženy změny ve výrobním postupu pro zkvalitnění celého procesu obrábění, hlavně kvůli nedokončeným koutům a zaoblením, které nebyly dokonale obrobena z důvodu použití příliš velkého nástroje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOLEŽEL, Jiří. *Frézování jednoduchých tvarových ploch* [online]. Kroměříž, 2011 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=29713&docGroup=5749&cmd=0&instance=2>
- [2] SADÍLEK, Marek a Zuzana SADÍLKOVÁ. *Počítačová podpora procesu obrábění: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 9788024827704.
- [3] SADÍLEK, Marek a František KOSAŘ. Řešené praktické příklady v CSD systému MasterCAM: učební text předmětu "CAD/CAM systémy v obrábění" a "CAD/CAM systémy v obrábění II". Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 9788024827063.
- [4] SADÍLEK, Marek. *Počítačová podpora výroby*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 9788024827384.
- [5] KELLER, Petr. *Programování a řízení CNC strojů* [online]. Liberec, 2005, , 51 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf
- [6] Mastercam. *CAD/CAM Software Mastercam* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.mastercam.cz/kategorie/mastercam-57297>
- [7] CAD.cz. *CAM systémy a výroba tvarových ploch* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2321-cam-systemy-a-vyroba-tvarovych-ploch.html>
- [8] BLAŽEK, Petr. *Pokročilé obrábění*, MM Průmyslové spektrum, 2004, č.12, s. 51. ISSN 1212-2572
- [9] DMG MORI. *DMU 50* [online]. 2016 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=1440>
- [10] RENISHAW. *RMP60 obrobková sonda s radiovým přenosem signálu*. [online]. 2016 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/68c420189e65469c839a5bfe20f3d3ff.pdf>
- [11] Kastr. *Centrální upínač CU-T 77* [online]. Rozhraní, 2004 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.upinace.cz/cu77.php>
- [12] FOJTÍK, Pavel. *Zpráva z průmyslové praxe* [online]. In.: 2017, s. 9 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docview/59/43603720/#file=/storage/59/43603720/43603720.pdf>

- [13] BRTSERVIS. *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://brtservis.cz/produkty-wenzel/souradnicove-merici-stroje/>
- [14] GLEICH. *CERTAL SPC* [online]. 2016 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://gleich.de/cz/produkty/certal-spc/>
- [15] CNC Software, Inc. *Nápověda Mastercam*. USA, 2014
- [16] SANDVIK. *490-044C4-14H* [online]. 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/Pages/productdetails.aspx?c=490-044c4-14h>
- [17] SANDVIK. *R216.42-06030-AK10A H10F* [online]. 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/Pages/productdetails.aspx?c=r216.42-06030-ak10a%20h10f>
- [18] SANDVIK. *R216.42-04030-AK08A H10F* [online]. 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/Pages/productdetails.aspx?c=r216.42-04030-ak08a%20h10f>
- [19] RENISHAW. [online]. 2017 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/1030.aspx>
- [20] *Machining & tooling magazine* [online]. Brno: Infocube, 2009-, **2014**(Speciál Renishaw). ISSN 18039634 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://infocube.cz/cs/machining-tooling-special-renishaw-20142014/>
- [21] KOŽÍŠEK, Michal. *Měření složitých tvarových ploch obrobkovou sondou a vyhodnocení přesnosti obrábění*. Plzeň, 2011. bakalářská práce (Bc.). ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta strojní
- [22] HEIDENHAIN. *iTNC 530 Příručka uživatele – cykly dotykové sondy* [online]. 2007 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/iTNC530/34049x-04/cs/533_189-C2.pdf
- [23] SEMACO. *Koeficient časů pro jednotlivé operace obrábění pro WorkNC* [online]. 2016 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.semaco.cz/cz/blog/308-koeficient-casu-pro-jednotlive-operace-obrabeni-pro-worknc>
- [24] SANDVIK. *R216.42-02030-AK30G 1620* [online]. 2017 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/Pages/productdetails.aspx?c=R216.42-02030-AK30G%201620>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	Program pro měřící sondu – na CD
Příloha B	Informační karty – na CD
Příloha C	Informační karty v angličtině – na CD
Příloha D	Tabulka k programu pro měřící sondu – na CD
Příloha E	Tabulka s hodnotami 1. Měření – na CD
Příloha F	Tabulka s hodnotami 2. Měření – na CD
Příloha G	Tabulka s hodnotami 3. Měření – na CD